# بررسی توزیع جریان بر زمان ماند و رفتار هیدرولیکی تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی (مطالعه موردی: اصفهان)

سیدسعید اخروی[1*]، سیدسعید اسلامیان[1]، نادر فتحیان‌پور[2] و منوچهر حیدرپور[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۷/۱۲)

## چکیده

**انتخاب نوع طراحی سیستم تالاب مصنوعی، علاوه‌بر توجه به توصیف جنبشی واکنش‌های بیولوژیک تصفیه، به آگاهی از الگوی جریان نیز وابسته است. در این پژوهش، به‌منظور مشخص نمودن رفتار هیدرولیکی داخلی سیستم، اثر نحوه توزیع جریان بر سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی به ابعاد ۴×۲۶ متر و با شیب ۱ درصد پرداخته شده است و به‌عنوان پارامتر متغیر برای نمایش توزیع جریان، از آرایش‌های ورودی جریان استفاده شده است. این آرایش‌ها شامل: ۱- حالت ورودی وسط، ۲- ورودی گوشه و ۳- ورودی یکنواخت بود. در تمامی حالات، خروجی ثابت بوده است. به‌منظور تعیین اثرات هیدرولیک توزیع جریان در سیستم تالاب مصنوعی از ردیاب اورانین برای ترسیم منحنی زمان ماند هیدرولیکی در هر آرایش استفاده شده است. نتایج نشان داد که زمان ماند میانگین هر آرایش به‌ترتیب ۴٫۵۳، ۳٫۲۴ و ۴٫۶۵ روز بوده است. ترسیم منحنی توزیع زمان ماند هیدورلیکی علاوه‌بر تعیین روند پخشیدگی جریان در طول سیستم، امکان تفسیر پارامترهای هیدرولیکی شامل حجم مؤثر و راندمان هیدرولیکی را فراهم نموده است. بدین‌ترتیب که در آرایش‌های ۱ و۳، حجم مؤثر ۸۷٫۵ درصد بوده است؛ درحالی‌که این مقدار در آرایش ۲، به‌دلیل وجود مسیرهای میان‌بر متعدد، ۶۲٫۱ درصد بود. در نهایت، آرایش ورودی یکنواخت به‌جهت بهبود عملکرد تصفیه پساب سیستم تالاب مصنوعی و استفاده از کل فضای محیط برای فرآیند تصفیه به‌عنوان بهترین آرایش جریان شناخته شد و پس از آن آرایش ورودی وسط دارای عملکرد مناسبی است.**

**واژه‌های کلیدی: پارامترهای هیدرولیکی، مسیرهای میان‌بر، ردیاب، زمان ماند**

۱ . گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲ . گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Saeid.Okhravi@gmail.com



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]

## مقدمه

بازیافت آب، استفاده از فاضلاب تصفیه شده برای مصارف سودمند، از قبیل آبیاری و مصارف صنعتی مانند خنک‌سازی است. امروزه، در گسترش این الگو، اصول پایداری، قوانین محیطی و مشارکت عمومی متحد می‌شوند. با نزدیک شدن بسیاری از جوامع به محدودیت منابع آب قابل دسترس، بازیافت و اصلاح آب موضوع قابل توجه‌ای برای نگهداری و تجدید منابع آب قابل دسترس می‌باشد. از اینرو، با تصفیه آب از یک سو می‌توان از آلودگی منابع آب سطحی و زیرسطحی جلوگیری نمود و از طرفی منبع جدیدی را برای استفاده در عرصه‌های مختلف به وجود آورد. اما نکته قابل توجه این است که با توجه به استانداردهای مصرف پساب، لزوم تصفیه بیشتر(تصفیه پیشرفته) انکارناپذیر است. جهت تصفیه بیشتر این‌گونه پساب‌ها راهکارهایی با چالش‌های مختلف موجود است که یکی از این راهکارها استفاده از تالاب‌های مصنوعی می‌باشد. معمولاً برای تصفیه فاضلاب‌های شهری و آب‌های جاری غیرمتمرکز، استفاده از تالاب‌ها به‌عنوان سیستم‌های کم‌هزینه با سرمایه‌گذاری کم که از فناوری و انرژی طبیعی استفاده می‌کنند، مناسب است. در این سیستم سازگار با محیط‌زیست، به‌دلیل الهام‌گیری از طبیعت، فرایندهای بیولوژیک تالاب‌های طبیعی برای حذف آلاینده‌ها صورت می‌گیرد (۱).

تالاب مصنوعی به‌عنوان یکی از سیستم‌های متداول تصفیه فاضلاب، شامل حوضچه‌ای آب‌بندی شده با عناصری از قبیل ماده بستر (محیط متخلخل)، گیاه، عایق آب‌بند و قسمت‌های ورودی و خروجی می‌باشد. فاضلاب ورودی به این سیستم به‌واسطه حضور عواملی مانند گیاه، میکروارگانیزم و ماده بستر تحت تأثیر فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک قرار گرفته و تصفیه می‌شود.

این سیستم به دو دسته کلی سطحی و زیرسطحی تقسیم می‌شود که در نوع سطحی، سطح جریان سیال روی بستر خاک است و در نوع زیرسطحی، سطح سیال زیر بستر شن است که در آنها جریان به‌صورت افقی و یا عمودی حرکت می‌نماید.

همچنین، نوع دیگری از تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی به نام تالاب‌های مصنوعی هیبریدی شناخته می‌شوند که جریان در آنها به‌صورت ترکیبی از جریان افقی و عمودی است.

امروزه، بهینه‌سازی و افزایش راندمان این سیستم‌ها با توجه به جایگاه ویژه تالاب مصنوعی به‌عنوان راهکاری کم‌هزینه برای تصفیه پساب در سیستم‌های شهری و غیرشهری در کشورهای پیشرفته و صنعتی بسیار مورد توجه قرارگرفته است و این مهم با بررسی رفتار هیدرولیکی سیستم‌های تالاب‌های مصنوعی محقق می‌گردد.

هیدرودینامیک تالاب‌های مصنوعی و ویژگی‌های مسیرهای جریان زیرسطحی در آنها توسط ردیاب‌ها بررسی می‌گردد. آزمایش به‌وسیله ردیاب برای کنترل فاکتورهای محیط متخلخل غیریکنواخت در تالاب‌های با جریان افقی زیرسطحی و همچنین تعیین ارتباط بین توزیع زمان ماند هیدرولیکی و میزان غیریکنواختی ذرات محیط به‌صورت کمی وکیفی استفاده می‌شود (۱۱).

مطالعات زیادی در مورد ویژگی‌های هیدرولیکی سیستم تالاب‌های سطحی حاوی گیاهان آبزی صورت نگرفته است. با این وجود، برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ از لیتیم به‌عنوان ردیاب استفاده شد و توزیع زمان ماند تالاب مصنوعی سطحی برای تصفیه فاضلاب (بدون پوشش گیاهی) به‌وسیله الگوی جریان کاملاً آشفته مدل شد (۶).

در پژوهشی در سال ۲۰۰۱ از ترکیب شیمیایی شامل برم به‌عنوان ردیاب برای رسم منحنی زمان ماند تالاب مصنوعی سطحی استفاده گشت. محققین این پژوهش ضریب پخشیدگی سیستم را بین ۱٫۲ تا ۱٫۵ $mm^2/s$ به‌دست آوردند. این محققین در سال ۲۰۰۳ نیز توزیع زمان ماند را برای تالاب مصنوعی زیرسطحی با مدل سلول‌های بدون آشفتگی جریان به‌خوبی نشان دادند و مسیرهای جریان را در آن مشخص نمودند (۴ و ۵).

تغییرپذیری پارامترهای هیدرولیکی در سلول‌های شنی



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]

سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی عمودی نشان داد که هدایت هیدرولیکی در تالاب‌های با جریان عمودی رفتار متغیری دارد که نتیجه آن غیریکنواختی الگوی جریان و توزیع زمان ماند بوده است. به‌طور خاص، راندمان تصفیه در این نوع تالاب‌ها با زمان ماند هیدرولیکی ارتباط نزدیکی دارد. این ارتباط از جایی مشخص می‌گردد که حذف آلاینده‌ها زمانی رخ داده که زمان تماس بین زیست‌توده‌های فعال و آب آلوده به اندازه کافی طولانی باشد تا فرآیندهای بیولوژیک و واکنش‌های آب قادر به حذف آلاینده‌ها شوند (۸). مطالعات نشان داده است که در سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۶ به ۹ روز، راندمان حذف BOD از ۷۲ درصد به ۹۲٫۵ درصد و راندمان حذف COD از ۲۸ درصد به ۶۴٫۵ درصد افزایش یافته است (۲). منحنی توزیع زمان ماند دارای $t_{peak}$ (زمان عبور حداکثر غلظت ردیاب از خروجی) کوچک‌تر نشانگر پخشیدگی جریان کمتر در سیستم می‌باشد که نتیجه آن عدم یکنواختی جریان و تصفیه کمتر پساب خواهد بود (۷).

محققین، پارامترهای نسبت طول به عرض، اندازه متوسط ذرات در محیط متخلخل، نرخ بار هیدرولیکی و آرایش ورودی و خروجی جریان را به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر زمان ماند سیستم و متعاقباً بر راندمان هیدرولیکی و راندمان تصفیه سیستم تالاب مصنوعی معرفی نموده‌اند. سو (۱۰) در سال ۲۰۰۹ نشان داد زمانی که نسبت طول به عرض در تالاب‌های مصنوعی با جریان سطحی بیشتر از ۵ باشد راندمان هیدرولیکی به ۰٫۹ و حتی بیشتر خواهد رسید. همچنین در پژوهش این محقق، راندمان هیدرولیکی آرایش ورودی یکنواخت- خروجی وسط در تالاب مصنوعی سطحی با نسبت طول به عرض ۱٫۸ برابر با ۸۸ درصد به‌دست آمد. درحالی‌که، این مقدار در آرایش ورودی گوشه- خروجی گوشه معادل با ۶۵ درصد برآورد شده است.

اما تا به امروز، تمرکز تحقیق بر پارامترهای بیولوژیک سیستم تالاب مصنوعی نظیر رابطه بین میکروارگانیزم‌ها، نوع گیاهان و اثربخشی خاص هر کدام در میزان راندمان تصفیه و کاهش آلودگی، انواع محیط‌های متخلخل گوناگون با دانه‌بندی و هدایت هیدرولیکی متفاوت و تغییرات میزان تصفیه مرتبط با آنها بوده است. همچنین تحقیقات متنوعی پیرامون نرخ حذف پارامترهای شیمیایی نظیر BOD، COD، TSS، TDS، $NH^{+}_{4}$، $NO^{-}_{3}$ و $PO^{3-}_{4}$ و میزان مواد مغذی متفاوت در سیستم مانند کربن، نیتروژن وآهن شده است. در مقایسه، مطالعات بسیار محدودی پیرامون اثر رفتار هیدرولیکی داخلی محیط متخلخل تالاب مصنوعی بر راندمان هیدرولیکی و در نتیجه راندمان تصفیه انجام گشته است. بنابراین هدف این پژوهش، ترسیم منحنی زمان ماند هیدرولیکی و محاسبه زمان ماند میانگین به‌عنوان کلیدی‌ترین پارامتر طراحی سیستم‌های تالاب مصنوعی در حضور آرایش‌های مختلف ورودی جریان به‌منظور تحلیل رفتار هیدرولیکی داخلی سیستم می‌باشد.

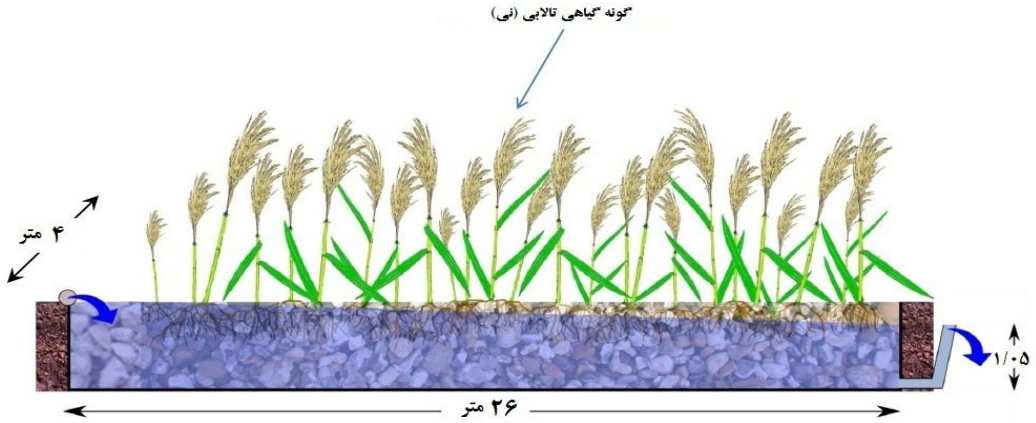
## مواد و روش‌ها

در این پروژه، از سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی با نسبت طول به عرض ۶٫۵ و شیب یک درصد استفاده شده است (شکل ۱). پساب مورد استفاده در این سیستم از تصفیه‌خانه شمال اصفهان (تصفیه‌خانه واقع در جاده حبیب‌آباد اصفهان) تأمین شده است. پساب مورد استفاده در این سیستم دارای pH و BOD حدود ۷/۲ و ۲۷ بوده است. در این سیستم، برای غیرقابل نفوذسازی بستر، از ورق ۱٫۵ میلی‌متری ژئوممبران استفاده شده است.

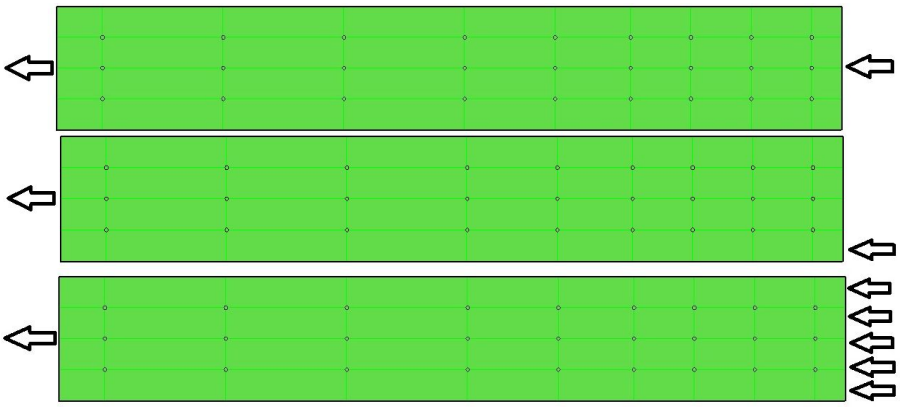
برای ایجاد محیط متخلخل نیز از ذرات شن استفاده شد که اندازه ذرات در یک متری ابتدا و انتهای سیستم یکسان و در دامنه ۲۵-۱۲ میلی‌متر است درحالی‌که اندازه این ذرات در قسمت میانی ۱۲- ۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، تخلخل محیط حدود ۳۳ درصد است. پساب پس از عبور از محیط در داخل حوضچه‌ای برای استفاده‌های بعدی اعم از کشاورزی و غیره ذخیره می‌شود. در این سیستم از نوع نی محلی اصفهان استفاده شده است. این پژوهش در بازه شهریور تا آذر ماه سال ۱۳۹۳ انجام شده است.



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]




**شکل ۱. ابعاد سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی**



**شکل ۲. آرایش‌های ورودی و خروجی سیستم**

### آرایش ورودی و خروجی

از آنجا که مکان قرارگیری ورودی و خروجی‌ها نیز تأثیر بسیار قابل ملاحظه‌ای بر رفتار هیدرولیکی سیستم دارد، در این مطالعه آنها در مکان‌هایی قرار گرفته‌اند که میزان اثربخشی و بازیابی آنها بر توزیع جریان به حداکثر خود برسد. این سیستم دارای لوله ورودی از جنس pvc در سطح و یک لوله pvc در قسمت انتهایی برای خروج پساب در نظرگرفته شده است. در پایان، لوله خروجی به لوله عمودی با مقطع باز به اتمسفر به هدف مشاهده سطح آب و غلظت ردیاب وصل شده است.

به‌عنوان یکی از اهداف اصلی این پژوهش که محاسبه زمان ماند هیدرولیکی میانگین در آرایش‌های مختلف لوله ورودی بوده است، سه حالت مختلف قرارگیری لوله ورودی جریان در سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی مورد آزمایش قرار گرفت. بدین‌منظورآرایش قرارگیری لوله ورودی به‌صورت ۱- ورودی وسط ۲- ورودی در گوشه و ۳- ورودی یکنواخت در تمام عرض تنظیم شد. در تمام حالات ورودی، خروجی سیستم از وسط بود (شکل ۲). برای تعیین روند حرکت آب در محیط متخلخل تالاب مصنوعی نیز از ۲۷ عدد پیزومتر به‌صورت ۹ ردیف ۳ تایی مطابق با شکل ۲ استفاده شد. پیزومترها با هدف نمایش چگونگی حرکت آب در سیستم و بازبینی ردیاب در مسیر جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

### اندازه‌گیری جریان

پساب از طریق پمپاژ و لوله به مکان حوضچه ورودی انتقال یافته و پس از تنظیم دبی در این حوضچه به‌وسیله سرریزهای



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]

تعبیه شده وارد سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی می‌شود. در نتیجه میزان تغییرات دبی روزانه بسیار کم بوده و در حقیقت برای انجام آزمایش‌ها ثابت می‌باشد. به‌منظور تفسیر داده‌های ردیاب، اندازه‌گیری جریان آب ورودی و خروجی تالاب ضروری می‌باشد. همچنین، غلظت ردیاب ترکیب شده با جریان اندازه‌گیری شده برای موازنه جرم ردیاب استفاده می‌گردد. نرخ جریان ورودی در زمان آزمایش و در آرایش‌های ورودی وسط، ورودی گوشه و ورودی یکنواخت به‌ترتیب ۶٫۵۸، ۶٫۵۲ و ۶٫۴ مترمکعب بر روز می‌باشد. فلاکس جریان نیز به‌ترتیب برابر با ۱٫۸۳، ۱٫۸۱ و ۱٫۷۸ متر بر روز است.

## آزمایش ردیاب

کاربرد عمده ردیاب‌ها در مهندسی آب، پی بردن به مواردی همچون جهت، مسیر، سرعت و زمان عبور آب است. در این پروژه، آزمایش ردیاب برای محاسبه توزیع زمان ماند به‌کار گرفته شده است تا پارامترهایی نظیر راندمان هیدرولیکی و حجم مؤثر محاسبه شوند. پارامترهای مذکور مشتقات منحنی زمان ماند هیدرولیکی بوده که نمایش‌دهنده رفتار هیدرولیکی سیستم می‌باشند و در ادامه به آنها پرداخته شده است.

به‌منظور انتخاب صحیح ردیاب، باید ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن درشرایط محیطی مختلف شناخته شود. با ارزیابی کارایی ردیاب‌های فلوئورسنت در شرایط محیطی مختلف، علاوه‌بر این‌که می‌توان ردیابی مناسب با شرایط محیط و هیدروژئولوژیک منطقه را انتخاب کرد، می‌توان اطمینان بیشتری به نتایج داشت وهمچنین ازآلودگی محیط زیست نیز پرهیز نمود.

در بین رنگ‌های فلوئورسنتی، اورانین (فلئورسین سدیم، ACID YELLOW- CI 45350) کمترین جذب را در محیط‌های قلیایی وخنثی داراست. در pH قلیایی، شدت فلوئورسانس اورانین به‌شدت افزایش و در pH اسیدی به‌شدت کاهش می‌یابد. به‌طوری که در pH کمتر از ۴، به ۱۰ درصد مقدار اولیه خود می‌رسد. بر طبق مطالعات، این واکنش برگشت‌پذیر بوده و با تغییر به‌حالت خنثی، شدت فلوئورسانس نیز به مقدار اولیه خود می‌رسد (۱۲). اورانین مقاومت زیادی در برابر افزایش شوری نشان می‌دهد و حتی در محیط‌های کاملاً شور نیز خاصیت فلوئورسانس خود را ازدست نمی‌دهد. برخلاف اکثر ردیاب‌ها، اورانین پایداری دمایی بالایی دارد. به‌طوری که حتی در دماهای بیش‌تر از ۷۰ درجه سلسیوس میزان شدت فلوئورسانس آن تغییری ندارد. به‌دلایل نامبرده و همچنین با توجه به ویژگی‌های منطقه مطالعاتی، اعم از نوع دانه‌بندی محیط متخلخل، pH پساب، دمای پساب، نرخ تجزیه فتوشیمیایی و قدرت سنجش در غلظت‌های کم، از ردیاب اورانین استفاده شد.

## تزریق ردیاب

تزریق ردیاب به‌طور کلی به دو روش تزریق لحظه‌ای (یکباره) و یا پیوسته (با دبی ثابت) صورت می‌گیرد. در روش تزریق لحظه‌ای، حجم کمی از ماده ردیاب به‌صورت ناگهانی وارد محیط می‌شود. درحالی‌که تزریق پیوسته مستلزم استفاده از لوازم خاص می‌باشد. در این پروژه، از روش تزریق لحظه‌ای استفاده شده است و اورانین با غلظت مشخص ۶ g/L در محل ورودی سیستم در هوایی آفتابی همراه با وزش ملایم باد وارد شد. غلظت انتخابی ردیاب با درنظرگیری مجموعه عواملی نظیر حجم کل پساب، هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل، دبی خروجی جریان، طول مسیر جریان، حداقل غلظت قابل تشخیص ردیاب، قدرت دستگاه سنجش فلوئورسانس، پایداری ردیاب و قیمت آن انتخاب شده است.

عمل تزریق ردیاب در هر سه حالت آرایش ورودی جریان در ساعت ۹- ۸ صبح انجام شده است و با نمونه‌برداری روزانه (هر روز صبح) از محل خروجی سیستم تالاب مصنوعی، غلظت آن مورد محاسبه قرارگرفت (شکل ۳). این عمل در آرایش ورودی یکنواخت و آرایش ورودی وسط در هشت روز متوالی و در آرایش ورودی گوشه در شش روز متوالی و با فاصله زمانی ۲۴ ساعت انجام شده است. اولین نمونه به‌طور مستقیم بعد از اضافه کردن ردیاب برداشت شده و به نام نمونه



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]

**شکل ۳. تزریق محلول رنگ اورانین در لحظه ورود جریان به تالاب**

صفر نامیده می‌شود (زمانی که هیچ غلظتی از اورانین در محیط وجود ندارد).

غلظت‌های خروجی برداشتی ردیاب نشانگر تابع توزیع غلظت در زمان و تابع توزیع تجمعی جرم ردیاب است. تابع توزیع زمان ماند حاصل از آزمایش ردیاب، میزان بازیابی ردیاب استفاده شده در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، آزمایش ردیاب به‌هدف محاسبه زمان ماند هیدرولیکی تا زمانی ادامه می‌یابد که ۹۰ درصد میزان جرم ردیاب وارد شده بازیابی گردد. لذا در طول انجام عملیات ردیابي رنگي اندازه‌گيري دبي خروجی سیستم به‌صورت مکرر ضروری می‌باشد. برای سنجش شدت فلوئورسانس نمونه‌ها از دستگاه فلوئوریمتر SYNERGY سری H ساخت شرکت BioTec کشور آمریکا استفاده شد.

## پارامترهای هیدرولیکی

زمان ماند هیدرولیکی بحرانی‌ترین پارامتر برای طراحی تالاب‌های مصنوعی می‌باشد. زمان ماند هیدرولیکی در حقیقت زمان فعالیت برای تصفیه آلاینده‌هاست. مطالعات نشان داده است که این پارامتر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان حذف آلاینده‌ها دارد (۳). عملکرد هیدرولیکی تالاب مصنوعی با مطالعه الگوهای جریان یا توزیع زمان ماند هیدرولیکی از طریق ردیاب برآورد می‌گردد. دو فاکتور هیدرولیکی اثرگذار بر روی عملکرد تصفیه سیستم تالاب مصنوعی با عنوان نرخ بار هیدرولیکی (Hydraulic Loading Rate) و زمان ماند هیدرولیکی (Hydraulic Retention Time) شناخته می‌شوند. زمان ماند هیدرولیکی اسمی (تئوری) با پارامتر $t_n$، از تقسیم حجم کل سیستم (حجم جریان) بر دبی جریان ورودی به‌دست می‌آید. درحالی‌که زمان ماند هیدرولیکی واقعی با پارامتر $t_m$، با استفاده از ردیاب و منحنی زمان ماند هیدرولیکی برآورد می‌شود. پارامتر $t_m$ به‌عنوان مرکز منحنی توزیع زمان ماند هیدرولیکی و همچنین به‌عنوان زمان متوسط حرکت یک ملکول آب از ابتدای سیستم به انتهای آن تعریف شده و از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$t_m = \frac{\int_0^\infty tCQdt}{\int_0^\infty CQdt} \qquad [۱]$$

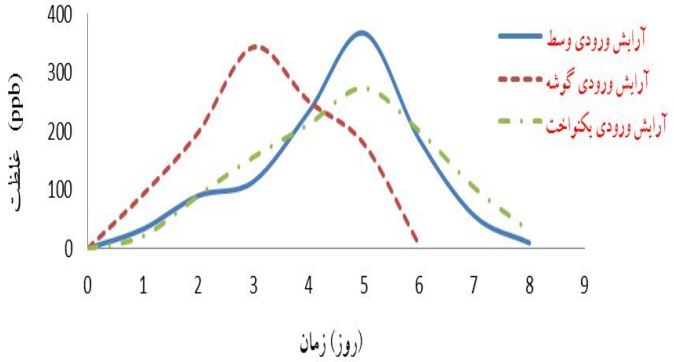
در رابطه ۱، Q، C، t به‌ترتیب دبی جریان خروجی، غلظت ماده ردیاب و زمان است. پس از ترسیم منحنی زمان ماند هیدرولیکی، برای تعیین رفتار هیدرولیکی تالاب مصنوعی مذکور از پارامترهای حجم مؤثر (Effective Volume) و راندمان هیدرولیکی (Hydraulic Efficiency) استفاده می‌شود. حجم مؤثر با ارتباط بین $t_m$ و $t_n$ تشریح می‌گردد.

$$e_v = \frac{t_m}{t_n} = \frac{V_{effective}}{V_{total}} \qquad [۲]$$

حجم مؤثر سیستم در رابطه ۲ حاصل تفریق حجم مرده از حجم کل (حجم داخلی تالاب با درنظرگیری تخلخل محیط) می‌باشد. حجم مؤثر به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر نسبت طول به عرض و آرایش ورودی و خروجی جریان قرار دارد. اگر شرایط ضعیف هیدرولیکی (غیریکنواختی جریان) برقرار باشد، زمان ماند هیدرولیکی و حجم مؤثر کاهش می‌یابد و در نتیجه راندمان حذف آلاینده‌ها در سیستم تالاب مصنوعی را



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]




**شکل ۴. منحنی‌های توزیع زمان ماند در سه آرایش ورودی مختلف**

کاهش می‌دهد. راندمان هیدرولیکی به‌عنوان نشانه‌ای از یکنواختی جریان داخل سیستم تالاب مصنوعی شناخته می‌شود. زمانی که راندمان هیدرولیکی بالاترین مقدار خود را دارد، طراحی هیدرولیکی سیستم مناسب بوده و جریان در آن به حالت یکنواخت نزدیک‌تر می باشد.

$$\lambda = \frac{t_p}{t_n} \qquad [۳]$$

در رابطه ۳، $t_p$ زمانی است که حداکثر غلظت ردیاب از نقطه خروجی برداشت می‌شود. پرسن و همکارانش (۹) در سال ۱۹۹۹ سه دامنه برای دسته‌بندی راندمان هیدرولیکی به‌صورت، $\lambda > ۰/۷$ راندمان هیدرولیکی ایده‌ال، $۰/۵ < \lambda \leq ۰/۷$ راندمان هیدرولیکی مناسب و $\lambda \leq ۰/۵$ راندمان هیدرولیکی ضعیف، ارائه نمودند. همچنین میزان مسیرهای میان‌بر در سیستم توسط پارامتر تعریف شده کمی S بیان می‌شود. هرچه این عدد بیشتر باشد نمایانگر کاهش مسیرهای میان‌بر در سیستم و یکنواختی بالاتر جریان است. در این نسبت $t_{۱۶}$ و $t_{۵۰}$ بیانگر زمان عبور ۱۶ درصد و ۵۰ درصد جرم ردیاب از خروجی سیستم است که از منحنی زمان ماند تجمعی حاصل می‌شود (شکل ۵).

$$S = \frac{t_{۱۶}}{t_{۵۰}} \qquad [۴]$$

## نتایج و بحث

### منحنی زمان ماند

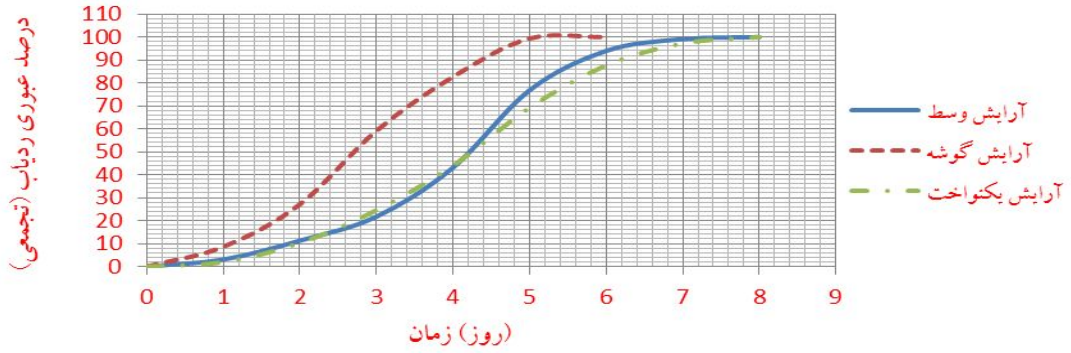
برای محاسبه زمان ماند میانگین در هر آرایش جریان، منحنی توزیع زمان ماند ترسیم شد. میزان بازیابی ردیاب آرایش‌های ورودی وسط، گوشه و یکنواخت به‌ترتیب ۹۹، ۹۶ و ۹۹ درصد بوده است و زمان ماند میانگین آنها نیز ۴/۵۳، ۳/۲۴ و ۴/۶۵ روز می‌باشد.

با توجه به منحنی زمان ماند برای آرایش‌های مختلف مشخص می‌شود که آرایش جریان ورودی یکنواخت با زمان ماند بالاتر از بقیه بیشترین راندمان تصفیه و عملکرد بهینه جریان را دارا می‌باشد.

به‌طور کلی این منحنی نمایانگر آن است که در ابتدا غلظت با شتاب زیادی به نقطه اوج خود می‌رسد و سپس به تدریج به‌علت رقیق شدن ردیاب، میزان آن کاهش می‌یابد. اما در این پژوهش، همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، منحنی زمان ماند در آرایش ورودی یکنواخت با شیب ملایمی رو به افزایش است و این روند در حالت ورودی وسط دارای شیب کمتر و حالت ورودی گوشه دارای شیب بالایی در رسیدن به نقطه اوج است. وجود شیب زیاد در ابتدای این نمودار نتیجه سریع رسیدن غلظت بالایی از ردیاب به نقطه خروجی سیستم و وجود مسیرهای میان‌بر بیشمار در آن است. مسیرهای میان‌بر سبب کاهش زمان ماند هیدرولیکی و کاهش عملکرد سیستم برای تصفیه می‌شود. به‌عنوان نمونه، میزان بازیابی ردیاب در سه روز برای آرایش ورودی وسط، گوشه و یکنواخت به‌ترتیب برابر ۲۰/۸، ۵۷ و ۲۳/۸ درصد بوده است (شکل ۵). به وضوح مشخص است که شیب منحنی زمان ماند در آرایش ورودی



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]




**شکل ۵. منحنی‌های زمان ماند تجمعی در سه آرایش ورودی مختلف**

گوشه به شدت زیاد بوده و تنها در سه روز آزمایش ۵۷ درصد از غلظت ورودی رنگ از محیط خارج گشته است و غلظت حداکثر نیز در روز سوم ($t_p$) رخ داده است. در حالی که در دو آرایش دیگر، میزان غلظت عبوری رنگ تقریباً ۳۰ درصد کمتر است که حاکی از مسیرهای میان‌بر کم‌تر و یکنواختی و پخشیدگی مناسب جریان است. همچنین $t_{50}$ محاسبه شده از نمودار زمان ماند تجمعی نیز گواه بر این ادعا است. میزان زمان لازم برای عبور ۵۰ درصد غلظت رنگ در آرایش‌های ورودی وسط، گوشه و یکنواخت به‌ترتیب ۴٫۲۳، ۲٫۷ و ۴٫۲ روز است.

با توجه به شکل ۴، مقدار $t_{peak}$ در حالت ورودی وسط و یکنواخت روز پنجم و در حالت ورودی گوشه روز سوم می‌باشد. این مشاهده وجود مسیرهای میان‌بر در حالت ورودی گوشه را به وضوح نشان می‌دهد. بدین‌حالت که جریان به‌طور مستقیم از گوشه سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی به سرعت به نقطه خروجی رسیده است.

همچنین $t_{peak}$ به‌عنوان نمایه‌ای از پخشیدگی در سیستم شناخته می‌شود. بدین‌مفهوم که تابع منحنی توزیع زمان ماند هیدرولیکی با $t_{peak}$ کوچک‌تر، دارای کمترین پخشیدگی جریان در سیستم می‌باشد. با توجه به منحنی‌ها می‌توان متوجه شد که نقطه اوج منحنی زمان ماند ($C_{peak}$) در حالت ورودی یکنواخت به‌دلیل پخشیدگی بالاتر در کل محیط متخلخل، بسیار پایین‌تر از دو حالت دیگر است که نشان از یکنواختی جریان در طول سیستم، بیشترین پخشیدگی و استفاده از کل فضای محیط برای فرایند تصفیه است، درحالی که در ورودی از گوشه، اورانین‌ها سریعاً به خروجی رسیده است و غلظت بالاتری را نیز از خود نشان داده است.

## نتایج هیدرولیکی

برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی نظیر حجم مؤثر، میزان مسیرهای میان‌بر و راندمان هیدرولیکی نیاز به نتایج منحنی زمان ماند و منحنی زمان ماند تجمعی است. با توجه به منحنی زمان ماند تجمعی می‌توان برای هر آرایش زمان‌های $t_{16}$ و $t_{50}$ را محاسبه نمود. در جدول ۱ آرایش ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب آرایش ورودی وسط، گوشه و یکنواخت هستند.

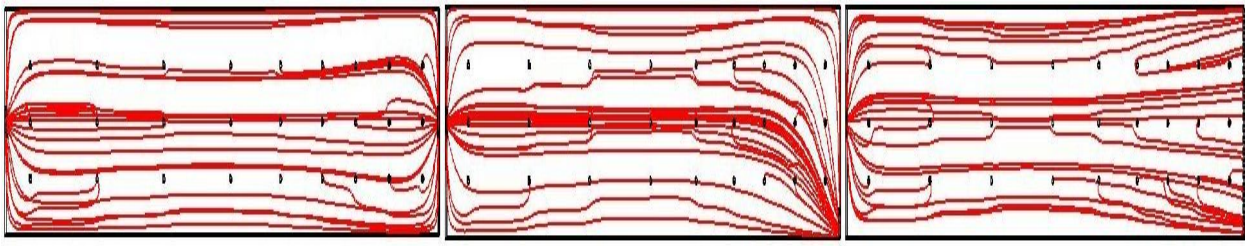
طبق نتایج جدول ۱، در تمامی آرایش‌ها، زمان ماند میانگین از میزان زمان ماند اسمی همواره کمتر بوده است که نتیجه آن ایجاد مسیر میان‌بر (پرسرعت) در سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی است. زمانی که جریان در کل سیستم پخش شود، زمان ماند میانگین به زمان ماند اسمی نزدیک‌تر می‌گردد که نتیجه آن راندمان بالاتر تصفیه و عدم وجود حجم مرده خواهد بود. این میزان با $e_v$ (حجم مؤثر) نمایش داده شده است. حجم مؤثر در آرایش ورودی وسط و ورودی یکنواخت ۸۷٫۵ درصد است که این بدین معناست که ۱۲٫۵ درصد حجم مرده در سیستم وجود دارد. در حالی‌که این مقدار در آرایش ورودی گوشه افزایش یافته و حجم مرده آن تقریباً برابر با ۳۸ درصد



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]

**جدول۱. خلاصه نتایج پارامترهای هیدرولیکی حاصل از منحنی زمان ماند**

| حالت | $t_n$ | $t_{16}$ | $t_{50}$ | $t_m$ | S | $e_v$ | λ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۵٫۱۷۶۵ | ۲٫۴۵ | ۴٫۲۳ | ۴٫۵۳۲ | ۰٫۵۸ | ۰٫۸۷۵ | ۹۴ |
| ۲ | ۵٫۲۲۴ | ۱٫۴ | ۲٫۷ | ۳٫۲۴۲ | ۰٫۵۱ | ۰٫۶۲۱ | ۵۷ |
| ۳ | ۵٫۳۲۲ | ۲٫۴۱ | ۴٫۲ | ۴٫۶۵۷ | ۰٫۵۷ | ۰٫۸۷۵ | ۹۶ |



**شکل ۶. نمایش خطوط جریان سیال در سه آرایش ورودی مختلف به‌ترتیب از راست به چپ (۱-۲-۳)**

است که نشان دهنده عدم استفاده از تمامی گنجایش تالاب مصنوعی می‌باشد. این مفهوم در قالب پارامتر S نیز پدیدار می‌شود. بدین‌منظور که افزایش S نشان دهنده کاهش اثر وجود مسیرهای میان‌بر است. در این سیستم، میزان S در آرایش‌های ورودی یکنواخت و وسط تقریباً برابر است. اما در آرایش گوشه، میزان S کاهش یافته که نمایانگر وجود مسیرهای میان‌بر بسیار زیاد است. بنابر نظر پرسن و همکارانش (۹)، تغییرات کمی در میزان این پارامتر نمایانگر مسیرهای میان‌بر متفاوت در سیستم است.

خطوط جریان براساس حل معادله دیفرانسیلی مسیرهای جریان در طول محیط متخلخل (معادله دارسی) در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد. مسیرهای رسم شده در نرم‌افزار مسیرهای غالبی هستند که جریان تمایل به حرکت در آنها را دارد. در شکل ۶ به وضوح مشخص است که توازن خطوط جریان به سمت خروجی بیشتر می‌شود، بدین مفهوم که خطوط جریان به سمت خروجی به‌صورت موازی و منظم تغییر می‌یابند.

براساس رابطه تعریف شده برای محاسبه راندمان هیدرولیکی، میزان آن به‌ترتیب برای آرایش ورودی وسط، گوشه ویکنواخت معادل با ۹۴، ۵۷ و ۹۶ درصد بوده است. آرایش ورودی وسط و یکنواخت دارای راندمان بیش از ۷۰ درصد می‌باشند که از لحاظ هیدرولیکی راندمان ایده‌ال محسوب می‌شود. دلیل عدم تفاوت قابل‌ملاحظه بین راندمان هیدرولیکی این دو آرایش، پایین بودن سرعت جریان در سیستم می‌باشد.

با توجه به براورد سرعت جریان (حاصل تقسیم سرعت دارسی (فلاکس جریان) به تخلخل محیط) در محیط متخلخل سیستم در آرایش‌های مختلف و محاسبه میزان زمان ماند میانگین هر آرایش می‌توان رابطه منطقی بین آنها را مشاهده نمود. با توجه به ابعاد سیستم (طول ۲۶ متر) می‌توان با حاصلضرب سرعت واقعی جریان (۵/۵، ۵/۴۴ و ۵/۳۵ متر بر روز) در زمان ماند میانگین این سیستم، مسافت طی شده ردیاب در این زمان را مشخص نمود. در آرایش ورودی وسط و یکنواخت، برآورد مسافت طی شده با توجه به سرعت واقعی جریان معادل تقریباً ۲۵ متر است. این عدد در آرایش ورودی گوشه معادل با ۱۷٫۶ متر می‌باشد. تفاوت اعداد مشاهده شده به‌خصوص در آرایش گوشه ناشی از عدم پخشیدگی جریان در کل سیستم، وجود مسیرهای پرسرعت و نهایتاً تخمین زمان ماند



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]

کمتر می‌باشد. زیرا تقریباً سرعت واقعی جریان در همه حالات به‌دلیل یکسان بودن محیط متخلخل و شیب هیدرولیکی جریان برابر است.

## نتیجه‌گیری

توجیه رفتار هیدرولیکی داخلی محیط متخلخل سیستم تالاب مصنوعی از زمینه‌های در حال توسعه این دانش به‌منظور تصفیه بیشتر پساب می‌باشد. با توجه به تأثیر مستقیم زمان ماند میانگین در میزان راندمان تصفیه فاضلاب در سیستم تالابی، مشخص است که آرایش ورودی یکنواخت بهترین حالت برای توزیع جریان فاضلاب در سیستم است. همچنین، شیب منحنی زمان ماند برای رسیدن به نقطه اوج منحنی رابطه مستقیم با میزان بازیابی ردیاب دارد. به وضوح مشخص است که شیب منحنی زمان ماند در آرایش ورودی گوشه به‌شدت زیاد بوده و تنها در سه روز آزمایش ۵۷ درصد از غلظت ورودی رنگ از محیط خارج گشته است و غلظت حداکثر نیز در روز سوم رخ داده است. در حالی‌که در دو آرایش دیگر میزان غلظت عبوری رنگ تقریباً ۳۰ درصد کمتر است. خروج سریع ردیاب از محیط تالاب مصنوعی و در حقیقت زمان ماند میانگین کم حاکی از وجود مسیرهای میان‌بر در محیط متخلخل و عدم استفاده از تمامی حجم سیستم است. زیرا وجود مسیرهای میان‌بر در سیستم با کاهش زمان ماند لازم برای تصفیه کامل ذرات به‌طور قابل ملاحظه‌ای از میزان تصفیه مورد انتظار می‌کاهد.

نتایج هیدرولیکی حاصل از نحوه توزیع جریان در سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی مذکور حاکی از غیریکنواختی جریان و وجود مسیرهای میان‌بردر آرایش ورودی گوشه است که نتیجه آن راندمان هیدرولیکی کم‌تر نسبت به دو حالت دیگر است. حجم مرده در دو آرایش ورودی وسط و ورودی یکنواخت ۱۲٫۵ درصد و در حالت ورودی گوشه ۳۸ درصد است که حاکی از عدم توزیع جریان ایده‌ال در سیستم و مسیرهای پرسرعت جریان در محدوده ورودی جریان است.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد هیدرولیکی سیستم تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی در دو آرایش ورودی یکنواخت ایده‌ال، در ورودی وسط مناسب و در آرایش ورودی گوشه ضعیف است. کارایی آرایش ورودی یکنواخت به‌دلیل زمان ماند میانگین بیشتر برای عملیات تصفیه پساب بیشتر می‌باشد.

## منابع مورد استفاده


۱. اسلامیان، س. س.، س. داوری، س. س. اخروی و ص. ترکش اصفهانی. ۱۳۹۰. گیاه پالایی از طریق مکانیزم جذب فلزات ناچیز در تالاب‌های مصنوعی. اولین همایش گیاه‌پالایی. مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی.کرمان. ۲۷ بهمن ۱۳۹۰.

۲. امینی‌راد، ح.، ع. ا. عظیمی، ن. ناصری و ف. گلبابایی.۱۳۹۰. تصفیه تکمیلی فاضلاب صنایع داروسازی با استفاده از تالاب مصنوعی، مطالعه مورد کارخانه داروسازی ایران. کنفرانس بین‌المللی آب و فاضلاب. تهران. اردیبهشت ماه ۱۳۹۰.

3. Dierberg, F. E., J. J. Juston, T. A. DeBusk, K. Pietro and B. Gu .2005. Relationship between hydraulic efficiency and phosphorus removal in a submerged aquatic vegetation-dominated treatment wetland. Ecol. Eng. 25: 9-23.

4. Grismer, M. E., M. A. Carr and H. L. Shepherd. 2003. Evaluation of constructed wetland treatment performance for winery wastewater. Water. Environ. Res. 75: 412-421.

5. Grismer, M. E., M. Tausendschoen and H. L. Shepherd. 2001. Hydraulic characteristic of a subsurface flow constructed wetland for winery effluent treatment. Water. Environ. Res. 73: 466-477.

6. King, A. C., C. A. Mitchell and T. Howes. 1997. Hydraulic tracer study in a pilot scale subsurface flow constructed wetland. Water. Sci. Technol. 35(5): 189-196.

7. Machate, T., H. Behrens, D. Klotz, H. Noll, K. W. Schramm and A. Kettrup. 1998. Evaluation of the hydraulic characteristics and flow pattern in a constructed wetland by means of tracer studies. Fresenius. Environ. Bull. 7:




[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]

635-641.
8. Małoszewski, P., P. Wachniew and P. Czuprynski. 2006. Study of hydraulic parameters in heterogeneous gravel beds: Constructed wetland in Nowa Slupia (Poland). J. Contam. Hydrol. 331(3): 630-642.
9. Persson, J., N. L. G. Somes and T. H. F. Wong. 1999. Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds. Water. Sci. Technol. 40(3): 291-299.
10. Su, T. M., Sh. Yang, S. Shih and H. Lee. 2009. Optimal design for hydraulic efficiency performance of free-water-surface constructed wetlands. Ecol. Eng. 35: 1200-1207.
11. Suliman, F., H. French, L. E. Haugen, B. Klove and P. Jenssen. 2005. The effect of the scale of horizontal subsurface flow constructed wetlands on flow and transport parameters. Water. Sci. Technol. 51(9): 259-266.
12. Weidner, C., L. Naurath, T. Röde and A. Banning. 2011. A new approach to quantify Na-Fluorescein (Uranine) in acid mine waters. Mine. Water. Environ. 30: 231-236.

[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-06-21 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.74.8.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.74.8 ]